Auscultation tridimensionnelle d'ouvrages d'art

Depuis quelques années, le laboratoire de topométrie de la Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD) développe et teste un concept d'auscultation tridimensionnelle d'ouvrages d'art. La détection de mouvements absolus et relatifs implique la combinaison de mesures GNSS et terrestres. Pour conserver l'information tridimensionnelle des observations, l'ajustement est réalisé avec le logiciel Trinet+ élaboré par ce même laboratoire. Des applications sur des ponts autoroutiers et sur le volcan Arenal au Costa Rica ont démontré la validité du procédé.

Seit einigen Jahren entwickelt und testet das Labor für geodätische Messtechnik der Hochschule für Technik und Wirtschaft Waadt (HEIG-VD) ein Konzept zur 3D-Bauwerksüberwachung. Der Nachweis von absoluten und relativen Bewegungen erfordert die Kombination von GNSS-Messungen und terrestrischen Aufnahmen. Damit die dreidimensionale Information der Beobachtungen erhalten bleibt, wird die Ausgleichung mit dem Program Trinet+ ausgeführt, welches vom gleichen Labor entwickelt wurde. Die Gültigkeit des Verfahrens wurde bei Anwendungen mit Autobahnbrücken und auf dem Vulkan Arenal in Costa Rica nachgewiesen.

Da alcuni anni, il laboratorio di topografia dell'Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD) sviluppa un metodo di monitoraggio tridimensionale di ponti e strutture in genere. La rilevazione dei movimenti assoluti e relativi di una struttura implica l'utilizzo simultaneo di misure GNSS e terrestri. Al fine di non perdere informazioni durante la restituzione dei dati tridimensionali, Trinet+, un software dedicato, è stato sviluppato presso i laboratori della HEIG-VD. La validità del metodo e del software è stata dimostrata dall'applicazione ai ponti autostradali e sul vulcano Arenal in Costa Rica.

P.-H. Cattin, J. Brahier, D. Jotterand

1. Contexte

La topométrie occupe une place toujours plus importante dans la surveillance et l'auscultation des ouvrages d'art (barrages, ponts, tunnels, etc.). Cette activité requiert généralement un niveau de précision élevé, c'est pourquoi les techniques de nivellement géométrique sont avantageusement utilisées dans la détection des mouvements verticaux. Toutefois, le maître d'œuvre demande fréquemment aujourd'hui d'être renseigné sur le comportement tridimensionnel de l'ouvrage et ceci aussi bien pour détecter des mouvements absolus que relatifs. La réponse à ces exigences est alors obtenue par la combinaison de mesures GNSS et terrestres (tachéométrie, nivellement), permettant un rattachement à l'extérieur de la zone d'auscultation. De plus, pour conserver l'information tridimensionnelle des observations GNSS et terrestres, il est judicieux de les ajuster à l'aide d'un modèle de compensation 3D.

Depuis quelques années, le laboratoire de topométrie de la Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD) a développé le logiciel d'ajustement 3D Trinet+ et a testé une méthodologie permettant de détecter les mouvements absolus et relatifs d'un ouvrage.

2. Conception du réseau d'auscultation

2.1 Détection des mouvements absolus par GNSS

La conception du réseau d'auscultation repose sur une structure à 3 niveaux:

- les points de rattachement supposés stables et mesurés par GNSS,
- les points qui assurent la liaison entre les points de rattachement et les mesures terrestres de l'ouvrage, et qui sont observés aussi bien par GNSS que par mesures terrestres,
- les mesures terrestres de l'ouvrage (tachéométrie et nivellement).

La détection des mouvements absolus de l'ouvrage impose un rattachement sur des points contrôlés et suffisamment éloignés de la zone susceptible de mouvements. En Suisse, le réseau de stations GNSS permanentes AGNES de swisstopo offre une excellente couverture du territoire et toutes les garanties d'un contrôle permanent de stabilité. Ainsi, quelques stations AGNES qui entourent l'ouvrage servent de points de rattachement. Elles forment, avec les points de liaison proches de l'ouvrage (4 à 6 points), le réseau GNSS pour la détection des mouvements absolus. Les lignes de base de ce réseau varient entre 20 et 60 km pour les points de rattachement et entre 0.2 et 1 km pour les points de liaison. Ce réseau (fig. 1) est observé 3 nuits consécutives durant 12 h. L'exploitation et l'ajustement des 3 sessions ainsi formées nous renseignent alors sur d'éventuels mouvements des points de liaison et, au besoin, nous permettent de redéterminer leur position tridimensionnelle.

2.2 Détection des mouvements relatifs par mesures terrestres

Afin d'éviter de travailler sur l'ouvrage lui-même (tablier d'un pont par exemple), le réseau d'auscultation est conçu pour être observé depuis des stations extérieures à l'ouvrage. Seuls des réflecteurs ou des récepteurs GNSS équipent l'ouvrage. Les mesures terrestres (tachéométrie et nivellement) sont alors rattachées aux points de liaisons, préalablement déterminés par GNSS. Le canevas topométrique (fig. 2) est conçu pour une exploitation et un ajustement tridimensionnels. C'est-à-dire que les 3 composantes de détermination (X, Y, Z) prennent la même importance dans la conception du réseau. Cette démarche nécessite, pour garantir les précisions tri-

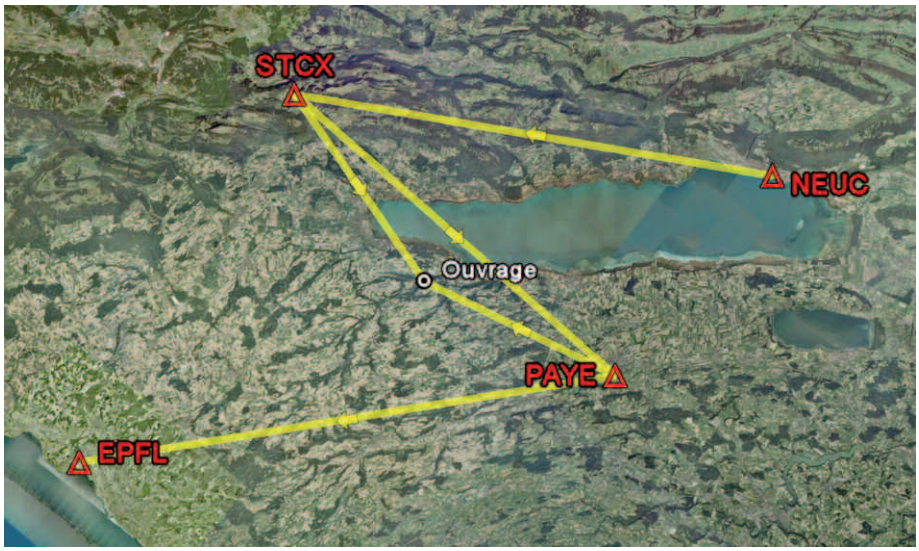

Fig. 1: Canevas du réseau GNSS avec les lignes de base.

dimensionnelles exigées, une attention particulière dans la mesure des angles zénithaux, des hauteurs d'instruments et de prismes. En plus des mesures GNSS et tachéométriques, de tels canevas peuvent être avantageusement améliorés par quelques cheminements de nivellement géométrique. Ceux-ci ne renseignant que sur la composante verticale, ils doivent être judicieusement choisis pour apporter une information substantielle dans l'ajustement 3D.

3. Ajustement tridimensionnel par moindres carrés

Pour exploiter les mesures GNSS et terrestres de manière optimale, il est opportun d'utiliser un modèle d'ajustement qui soit en adéquation avec la nature tridimensionnelle des observations. Ainsi, un modèle d'ajustement 3D basé sur un traitement par les moindres carrés s'impose. Il permet d'obtenir aisément des indicateurs de précision et de fiabilité aussi bien des observations que des positions. Pour satisfaire cet objectif, le laboratoire de topométrie a développé le logiciel d'ajustement tridimensionnel Trinet+, dont le noyau initial est issu d'un travail de diplôme en géomatique réalisé à la FHNW de Muttenz [1].

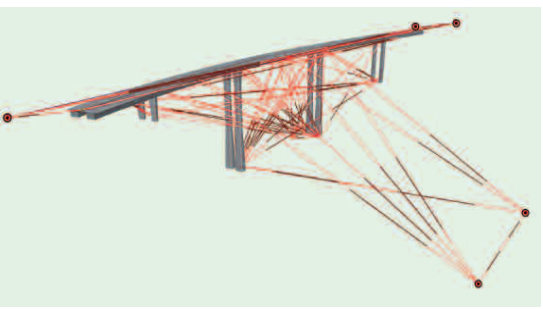

Fig. 2: Canevas des mesures terrestres avec les points de liaison.

3.1 Choix du concept d'ajustement

L'ajustement de mesures GNSS et terrestres peut se faire selon plusieurs combinaisons:

- par *l'ajustement de jeux de coordonnées.* Cette méthode consiste à traiter séparément les mesures GNSS et les mesures terrestres pour obtenir 2 jeux de coordonnées puis à ajuster ces 2 jeux de coordonnées par une transformation de Helmert 3 D par exemple,
- par *l'ajustement de coordonnées GNSS et de mesures terrestres.* Cette technique consiste à exploiter les observations GNSS pour obtenir des jeux de coordonnées par sessions puis à les assembler avec les mesures terrestres dans un ajustement 3D,
- par *l'addition des matrices des équations normales.* Pour cette solution, les mesures GNSS et terrestres sont exploitées séparément avec un modèle de compensation par moindres carrés jusqu'à l'obtention des équations normales de chaque système. Celles-ci sont ensuite additionnées pour la compensation finale. Cette solution a le grand avantage de conserver l'information stochastique de chaque type d'observations lors de la combinaison des systèmes.

Pour le logiciel Trinet+, c'est l'ajustement de coordonnées GNSS et de mesures terrestres qui a été retenu, ce concept est ainsi similaire à celui utilisé dans le logiciel LTOP (2D+1).

3.2 Choix du référentiel géodésique

Les relations d'observations entre les mesures et les paramètres inconnus sont formulées en fonction du référentiel géodésique choisi pour l'ajustement. Ainsi nous pouvons exprimer ces relations:

- sur un ellipsoïde de référence,
- dans un système tridimensionnel cartésien topocentrique (placé à la surface de la terre),
- dans un système tridimensionnel cartésien géocentrique (placé au centre des masses de la terre).

Trinet+ utilise un système tridimensionnel cartésien topocentrique comme cadre de référence (fig. 3).

3.3 Choix du modèle fonctionnel

Dans un système cartésien topocentrique, les relations d'observations entre mesures et paramètres peuvent s'écrire de différentes manières. Pour des réseaux de déformations, nous pouvons retenir les modèles suivants:

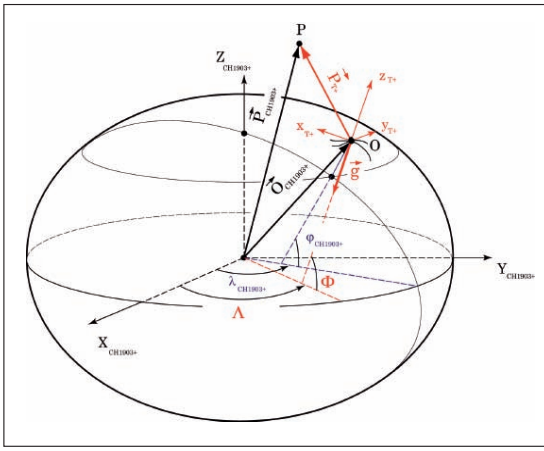

Fig. 3: Référentiel cartésien topocentrique.

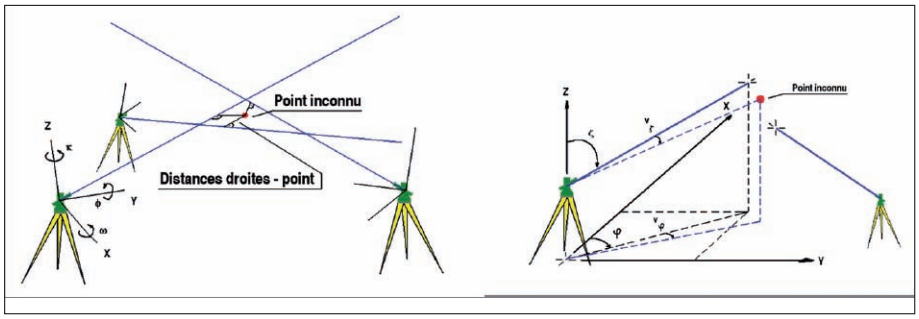

Fig. 4: Modèles fonctionnels: faisceaux de droites et observations topométriques.

- le modèle fonctionnel reposant sur la méthode des faisceaux de droites, utilisé avantageusement en photogrammétrie et en topométrie industrielle (fig. 4),
- le modèle fonctionnel exprimant les relations avec les observations topométriques effectivement réalisées sur le terrain (direction, angle zénithal, distance oblique, I, S, dénivelée, sessions GNSS) (fig. 4).

C'est ce dernier modèle qui est retenu pour Trinet+.

3.4 Logiciel Trinet+

En se basant sur un ajustement de coordonnées GNSS et de mesures terrestres, dans un référentiel topocentrique et selon un modèle fonctionnel lié aux observations topométriques, le logiciel Trinet+ a été développé au laboratoire de topométrie dans le cadre d'un travail de diplôme [2]. Ce développement a été poursuivi par des prestations réalisées par Sébastien Guillaume, alors étudiant master à l'ETHZ, lors de périodes de vacances. Ce logiciel a été validé par un calcul complet sous Matlab par Cyril Muller, assistant à la HEIG-VD à l'époque du développement. Sans décrire toutes les fonctionnalités de ce programme, nous pouvons relever qu'il permet:

- des transformations de coordonnées pour un calcul dans le référentiel topocentrique,
- la correction des observations pour les rendre compatibles avec un modèle 3D topocentrique,
- le choix de plusieurs paramètres comme inconnues (facteur d'échelle, constante d'addition, défauts de verticalités, hauteurs d'instruments et de réflecteurs, sessions GNSS, etc.) (fig. 5),
- les compensations libre, libre-ajustée et contrainte,
- le calcul d'indicateurs de précision (ellipsoïdes d'erreur moyenne) et de fiabilité (vecteurs de fiabilité externe),
- la visualisation 3D dynamique à plusieurs étapes du traitement pour faciliter l'analyse,
- l'importation et l'exportation selon plusieurs formats.

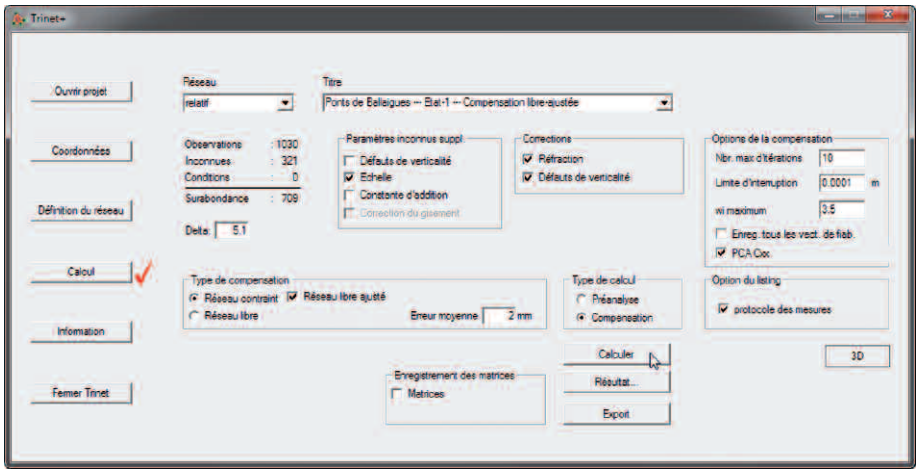

Fig. 5: Options de calcul de Trinet+.

Ce logiciel fonctionne sous Windows et les masques peuvent être affichés en français ou en allemand. Il en est de même pour les listages.

Les expériences acquises avec ce logiciel nous permettent d'évaluer les apports principaux d'un ajustement 3D comparativement à un modèle 2D+1:

- l'autocontrôle de certaines observations (angle zénithal, distance, I, S) est fortement amélioré, ce qui renforce sensiblement les indicateurs de fiabilité et la détection des fautes,
- une interaction plus efficace des types d'observations dans le réseau, ce qui conduit à un allègement substantiel du canevas 3D par rapport au 2D+1 et ceci pour des niveaux de précision et de fiabilité identiques.

Par contre, il faut relever que pour réaliser un bon ajustement tridimensionnel il est impératif de disposer d'observations de précision homogène, et ceci pour tous les types d'observations, y compris les hauteurs I et S. De plus, une bonne expérience dans l'analyse de l'ajustement de réseaux de déformations est utile pour appréhender le comportement tridimensionnel du réseau.

Le logiciel Trinet+ est actuellement commercialisé et utilisé par plusieurs bureaux pour l'auscultation géodésique.

4. Applications

4.1 Auscultation de ponts autoroutiers

Depuis quelques années, le laboratoire de topométrie réalise l'auscultation de ponts autoroutiers pour le compte de l'Office fédéral des routes (OFROU). Les prestations sont effectuées selon le scénario décrit ci-dessus et les ajustements sont calculés avec le logiciel Trinet+. Ces travaux permettent de tester et de valider le concept d'auscultation tridimensionnelle avant que des mandats ne soient attribués au secteur privé. Ainsi, pour réduire au maximum l'intervention du personnel sur le tablier des ponts, nous avons équipé récemment certains ouvrages de petits ré-

Fig. 6: Réflecteurs permanents sur un pont autoroutier.

flecteurs 360° de manière permanente (fig. 6).
A l'heure actuelle, plusieurs époques de mesures ont été réalisées sur plusieurs ouvrages. De cette expérience, nous en déduisons des précisions de 3 à 5 mm pour les positionnements absolus des points de liaison (par rapport aux stations permanentes AGNES) et de 1 à 3 mm pour les positionnements relatifs des points de surveillance (points sur l'ouvrage).

4.2 Auscultation du volcan Arenal (Costa Rica)

Pour solliciter et valider l'ensemble de ce processus d'auscultation géodésique, un réseau de surveillance d'un versant du volcan Arenal au Costa Rica (Amérique centrale) [Fig. 7] a été mis en place en partenariat avec l'Observatoire de volcanologie et de sismologie du Costa Rica (OVSICORI) rattaché à l'Université Nationale.

Cyril Muller, alors assistant à la HEIG-VD, a consacré 6 mois à ce projet, dont cinq mois au chevet du volcan Arenal. Il a ainsi, en collaboration avec les ingénieurs de l'OVSICORI, élaboré un canevas d'auscultation en accord avec nos concepts de surveillance et nos expériences, mesuré et exploité plusieurs époques d'observations, confronté ses résultats avec d'autres types d'observations du volcan. En finalité, les résultats obtenus avec Trinet+ confirment et valident l'efficacité du procédé testé sur les ponts. Dans le cadre de ce projet, Cyril Muller a formé les ingénieurs de l'OVSICORI à l'utilisation du logiciel Trinet+.

Remerciements

Ce projet et ces développements n'auraient pas pu avoir lieu sans le soutien financier de la Haute école spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO), qu'elle en soit ici vivement remerciée. Mes remerciements vont aussi aux ingénieurs de la Filiale d'Estavayer-le-Lac de l'Office fédéral des routes pour leur intérêt, leur appui et leur curiosité dans la mise en place et les tests d'un nouveau concept d'auscultation. Et pour conclure, mes remerciements s'adressent tout particulièrement à Sébastien Guillaume, un passionné sans qui ce projet n'aurait tout simplement pas eu lieu et à son compère Cyril Muller qui a beaucoup investi pour Trinet+ et les réseaux d'auscultation.

Références:

[1] S. Kracher & M. Wittensöldner, «3D-Netze, Präanalyse», travail de diplôme FHNW, 1999.

[2] S. Guillaume, «Implémentation de la compensation d'observations dans le logiciel Trinet», travail de diplôme HEIG-VD, 2002.

Fig. 7: Volcan Arenal.

[3] J. Schaffner, «Réseau d'auscultation des ponts sur la Menthue – surveillance topométrique des mouvements absolus», travail de diplôme HEIG-VD, 2004.

[4] D. Marty, «Réseau d'auscultation des ponts sur la Menthue – surveillance topométrique des mouvements relatifs», travail de diplôme HEIG-VD, 2004.

[5] F. Schmidt, «Ajustement tridimensionnel de mesures GPS et terrestres dans les réseaux d'auscultation», travail de diplôme HEIG-VD, 2006.

[6] S. Guillaume, C. Muller & P.-H. Cattin « Trinet+ – Mode d'emploi», HEIG-VD, 2008.

Paul-Henri Cattin, professeur
Julien Brahier, collaborateur scientifique
Didier Jotterand, collaborateur scientifique
Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD)
Département Environnement construit et géoinformation
Route de Cheseaux 1
CH-1401 Yverdon-les-Bains
paul-henri.cattin@heig-vd.ch